

Министерство науки и высшего образования РФ
Правительство города Севастополя
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»
Всероссийское гидробиологическое общество при Российской академии наук
Русское географическое общество
Паразитологическое общество при Российской академии наук

Изучение водных и наземных экосистем: история и современность

Международная научная конференция, посвящённая 150-летию
Севастопольской биологической станции —
Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского
и 45-летию НИС «Профессор Водяницкий»

Тезисы докладов

13–18 сентября 2021 г.
Севастополь, Российская Федерация

Севастополь
ФИЦ ИНБЮМ
2021

Итоги и перспективы гидробиологических исследований пелагического редоксклина и субкислородного слоя Чёрного моря

Мельников В. В.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

sevlin@rambler.ru

Почти 120 лет назад выдающийся учёный Н. И. Андрусов [1894] впервые показал, что высшие формы жизни в Чёрном море находятся в поверхностном слое до 80–200 м. Ниже вся толща вод до дна содержит сероводород, в котором могут обитать лишь некоторые виды бактерий. Предполагалось, что в зоне контакта кислорода и сероводорода происходит смешение вод с формированием особого смешанного, или С-слоя (толщиной 30–50 м), в котором, как писал Б. Н. Скопинцев [1975], происходит непосредственное равновесное взаимодействие O_2 и H_2S . Эти представления (в виде научной парадигмы) стали основой обширного количества исследований, среди которых ключевую роль сыграли крупные комплексные экспедиции ИО АН СССР в Чёрном море (64-й рейс НИС «Витязь» в 1978 г., 6-й рейс нового НИС «Витязь» в 1984 г., 7-й и 8-й рейсы НИС «Рифт» в 1985–1986 гг.). Они позволили получить принципиально новые сведения об особенностях структуры и функционировании экосистем глубоководных районов, дали толчок разработке новых методик и определили перспективные направления дальнейших исследований [монографии «Экосистемы...», 1980 ; «Современное состояние...», 1987 ; «Структура и продукционные характеристики...», 1989]. Итогом этих работ стало важнейшее гидробиологическое открытие: в нижнем слое кислородной зоны были обнаружены узкие по вертикали плотные слои планктона с различным составом [Виноградов, Шушкина, 1982 ; Виноградов и др., 1986, 1987а, б ; Флинт, 1989]. Впервые были определены предельные концентрации кислорода для распределения различных групп гидробионтов. Было доказано, что химические и бактериальные процессы в зоне редоксклина обеспечивают стабильность существования С-слоя [Сорокин, 1982 ; Волков, 1984], что подтверждалось измерениями скорости окисления сероводорода и данными о возможностях бактериопланктона, поэтому казалось, что теоретический вопрос взаимодействия кислорода и сероводорода в глубинах моря уже полностью решен.

Однако в 1988 г. выяснилось, что С-слоя вообще не существует: между кислородной зоной и сероводородными водами находится субкислородный слой, в котором нет ни кислорода, ни сероводорода [Murray et al., 1995]. Это открытие почти 15 лет не признавалось научным миром, пока не стало общепризнанным [Konovalov et al., 2005]. В результате произошло революционное изменение представлений о двухслойном море на представления о трёхслойном море [Murray et al., 1989 ; Konovalov et al., 2005]. Выяснилось, что причиной этих концептуальных изменений стали неточности метода Винклера, который в XX в. использовался для измерений концентрации кислорода в водах Чёрного моря. Этот метод основан на использовании окислительно-восстановительных свойств марганца: в щелочной среде $Mn(II)$ окислялся кислородом с образованием взвеси $Mn(IV)$, которая затем восстанавливалась в кислой среде иодидом, а йод потом оттитровывался [Стунжас, 2018]. Однако в Чёрном море на границе между кислородной и сероводородной зонами этот метод давал настолько большую погрешность, что кислород «обнаруживался» даже в сероводородном слое. Оказалось, что виной всему был бактериальный хемосинтез с выделением ионов марганца, который и завышал результаты измерений методом Винкле-

ра. Потребовались принципиально новые датчики для измерения концентраций кислорода, которые были бы свободны от ошибок метода Винклера. Такие (оптические) датчики разработаны лишь 15 лет назад; впервые они были использованы биологами в ходе широкомасштабных исследований глубин Чёрного моря, проводимых специалистами ИнБЮМ под руководством академиков Г. Г. Поликарпова и В. Н. Егорова [Егоров и др., 2011], и сотрудниками Института Балтийского моря (Warnemünde) в 15/1 рейсе НИС Maria S. Merian (Германия) в 2010 г. Наблюдения из подводной лодки с люминесцентными датчиками кислорода, выполненные М. Б. Гулиным, впервые позволили достоверно описать предельные глубины обитания рыб Чёрного моря [Заика, Гулин, 2011]. Продолжение этих работ в 33-м рейсе того же судна в 2013 г. В. В. Мельниковым совместно с коллегами из IOW привело к другому важному открытию [Melnikov et al., 2021a]: выяснилось, что плотные скопления зоопланктона в зоне редоксклина могут служить важным источником пищи для черноморского шпрота *Sprattus sprattus phalericus*. Оказалось, что эти рыбы обладают удивительной способностью «нырять» в практически бескислородную зону ($0,2 \text{ мл} \cdot \text{л}^{-1}$) и активно охотиться на «спящих» днём веслоногих рачков. При этом рыбы проходят сначала через слой других хищников — гребневигов *Pleurobrachia pileus*, которые при размерах около 2 см имеют полуметровые ажурные ловчие щупальца. Если рыбы совершают активные броски вниз, чтобы поймать веслоногих, то гребневики совершают медленные суточные миграции и днём образуют плотный слой над скоплениями рачков. Исследование такого поведения гребневигов привело к новому открытию [Melnikov et al., 2021b]: оказалось, что их скопления существенно изменяют биофизические свойства среды (в дневное время слой, где они концентрируются, начинает светиться). У поверхности биолюминесценция наблюдается только ночью, днём она угасает. Впервые было установлено, что у нижней границы кислородной зоны Чёрного моря всё наоборот: свечение усиливается днём, когда там концентрируется зоопланктон [Мельников и др., 2019].

Всё описанное выше касается нижней части кислородной зоны. Ещё немного глубже начинается практически не исследованный биологами субкислородный слой (30–50 м), в котором нет ни кислорода, ни сероводорода. По данным учёных из Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde, в этом слое наблюдаются скопления бактерий рода *Sulfurimonas* [Han, Herner, 2015], происходят интенсивные процессы хемосинтеза за счёт окисления H_2S с помощью MnO_2 [Henkel et al., 2019]. Нижний пик максимума фосфатов в субкислородном слое связан с деятельностью крупных магнитотактических бактерий рода *Magnetococcus*, которые перемещаются вверх и вниз в пределах субкислородной зоны, захватывая фосфаты в верхней части и высвобождая на нижней границе [Schulz-Vogt et al., 2019]. Исследования отдела радиационной и химической биологии ИнБЮМ показали, что в Чёрном море обнаружена закономерная связь между максимумами бактериального хемосинтеза и фосфатов вне зависимости от глубин залегания. Суммарная валовая продукция углерода в слое хемосинтеза достигала $250\text{--}450 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ [Поликарпов и др., 1990].

Иными словами, выяснилось, что в субкислородном слое имеется достаточно сложно организованная структура вертикального распределения жизни, которая больше похожа на внемную жизнь, поскольку процветает и интенсивно развивается при полном отсутствии кислорода. Чтобы понять хотя бы основные закономерности вертикального распределения этой жизни, в 117-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» этот слой впервые исследовался на предмет изучения вертикального распределения АТФ (универсального источника энергии для всех биохимических процессов, протекающих в живых системах) и фоновых характеристик среды. В результате впервые были получены интегральные профили распределения жизни в этом слое.